

1.6 μm 波段单频激光器技术研究进展

王 然 高春清

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 1.6 μm 波段单频激光器在测风激光雷达、差分吸收激光雷达、空间光通信以及光学参量振荡器抽运源等方面都有重要的应用价值。概述了目前全固态激光器实现单频输出的主要技术方法, 分别给出了微片腔法、扭转模腔法、腔内插法布里-珀罗(F-P)标准具法、环形行波腔法、耦合腔法、单块非平面环形腔法实现单频激光输出的工作原理和主要实验结果, 重点介绍了1.6 μm 波段全固态单频激光器国内外发展状况。

关键词 激光器; 1.6 μm 波段; 单频激光器; 人眼安全激光

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080006

Progress of 1.6 μm Region Single-Frequency Lasers

Wang Ran Gao Chunqing

(School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract 1.6 μm single-frequency lasers have important applications in laser wind lidars, differential absorption lidars, optical communication and pumping optical parametric oscillators. We introduce the main techniques to get single-frequency output in solid-state lasers, including micro-chip cavity, twisted mode cavity, the cavity with F-P etalons inside, traveling wave ring cavity, coupled cavity and the non-planar ring resonator. The research progress of 1.6 μm single-frequency lasers in China and abroad are summarized.

Key words lasers; 1.6 μm region; single-frequency laser; eye-safe laser

OCIS codes 140.3070; 140.3500; 140.3510; 140.3570; 140.3580

1 引言

自1960年世界上第一台激光器发明以来,各种类型的固体、气体、半导体、光纤等激光器在民用和军用领域得到了广泛的应用。近年来全固态单频激光器得到了越来越多的关注,由于这类激光器具有相干长度长、谱线宽度窄、光束质量好等优点,在激光雷达、相干光通信、光频标、量子信息、引力场测量、光学参量振荡器等领域都有重要的应用价值^[1-4]。不同的应用对于激光器的要求不甚相同,例如在光频标应用中,单频激光器的线宽和频率稳定性是非常重要的技术指标,但对于激光器的输出功率要求不高;在激光雷达应用中,激光光源对采用单频的脉冲激光器,对于激光器的脉冲能量、重频等都有相应的要求,其单频激光线宽在理想情况下与激光器的脉冲宽度有对应的关系;如果是作为光学参量振荡器的抽运源,单频激光的平均功率越高越好。本文概述了目前全固态激光器实现单频输出的主要技术方法,并重点介绍了1.6 μm 波段全固态单频激光器的发展状况。

2 实现单频激光输出的主要方法

一般激光器输出的激光均为多纵模输出,例如在固体激光器中,激光晶体的空间烧孔效应导致固体激光器为多纵模输出。为实现单纵模激光输出,就需要对腔内模式进行选择,使激光器只有一个纵模可以振荡。常用的实现单纵模激光输出的方法有以下几种:短腔法、扭转模腔法、腔内插入法布里-珀罗标(F-P)准具法、

收稿日期: 2013-04-03; **收到修改稿日期**: 2013-05-03; **网络出版日期**: 2013-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61178027)、北京市自然科学基金(4132036)

作者简介: 王 然(1984—),男,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: hellowangran@bit.edu.cn

导师简介: 高春清(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事新型激光器件与技术、光电子信息系统等方面的研究。

E-mail: gao@bit.edu.cn(通信联系人)

耦合腔法、环形腔法、单块非平面环形腔(NPRO)法等。

短腔(微片)法就是通过缩短腔长、增大纵模的间隔,使得在激光介质增益线宽内只有一个纵模可以振荡,这样的激光器也称微片激光器。由于激光介质增益长度的限制(小于1 mm),短腔法很难获得高功率的单频激光输出。1991年,日本Osaka大学Sasaki等^[5]采用1 W激光二极管(LD)抽运1 mm厚的微片激光器,得到了221 mW的1064 nm单频激光输出。1998年,法国Laboratoire d'Optique Appliquée研究所Bourdet等^[6]采用同样厚度的Tm:YVO₄微片获得了62 mW的1920 nm单频激光输出。

扭转模腔法是通过消除谐振腔内的驻波效应实现单纵模振荡的一种方法,通过在激光晶体的两端放置1/4波片,使得振荡光的偏振态在通过增益介质的时候产生旋转,从而消除腔内的驻波效应,保证单个纵模在模式竞争中的优势^[7]。但因为激光介质热致双折射效应的存在,采用扭转模腔获得的单纵模激光运转一般不太稳定,容易产生跳模。2005年,华东师范大学Wu等^[8]采用LD抽运扭转模腔Nd:GdVO₄激光器获得了2.1 W的1064 nm单频激光输出,斜效率约为20%。2011年,北京理工大学Gao等^[9]报道了2 μm Tm:YAG扭转模单频激光器,通过在谐振腔内插入1/4波片和偏振片,获得了1.46 W单频激光输出,斜效率为19.2%。

F-P标准具法通过在激光谐振腔内插入F-P标准具,使得所选的纵模较其他纵模损耗更小,从而在模式竞争中占优势,最后实现单频输出。腔内插入标准具的单频激光器实现起来比较容易,输出激光的波长也容易调节,但在较高抽运功率下F-P标准具难以抑制其他纵模的产生,因此很难实现高功率的单频激光输出。美国相干技术公司(CTI公司)利用腔内插F-P选模方法设计了紧凑的METEOR单频激光器,在-25℃下获得了中心波长2.05 μm的Tm,Ho:YLF单频激光输出,输出功率120 mW,波长调谐范围15 GHz^[10]。2004年,哈尔滨工业大学Zhang等^[2]使用LD抽运Tm,Ho:YLF激光器,利用F-P标准具进行纵模选择,获得了113 mW波长2067 nm单频激光输出。

耦合腔法^[11]与腔内插F-P标准具法类似,就是利用激光介质与腔镜之间的F-P效应抑制多纵模,实现单纵模输出。1995年,丹麦科技大学Pedersen等^[12]利用耦合腔方法获得350 mW的1064 nm单频激光输出,斜效率35%。

环形行波腔法就是利用环形腔结构消除谐振腔内的驻波效应,实现单频激光输出。环形行波腔法输出稳定,可以获得高功率单频激光输出,但环形行波腔激光器由于使用了较多的分离光学元件,体积一般较大。山西大学对环形腔法实现单频激光输出进行了深入研究,2004年他们以Nd:YVO₄作为工作物质,设计了六镜环形腔结构,采用双端抽运方式,在抽运功率32.3 W的情况下,获得了10.4 W的1064 nm单频激光输出^[13]。2010年,华北光电所陈三斌等^[14]采用环形腔结构,以Nd:YVO₄作为工作物质,获得了10.48 W的1064 nm单频激光输出。2011年,中国科学院半导体研究所赵伟芳等^[15]采用光纤耦合输出激光二极管(FCLD)抽运Nd:GdVO₄晶体,采用四镜折叠环形腔,通过在腔内插入法拉第旋光器和半波片实现激光的单向运转从而抑制空间烧孔效应,在腔内插入标准具后,压缩了单频激光的线宽,获得了连续单频1063 nm 7.57 W单频激光输出。

NPRO激光器集单向环形腔优良的单模特性与单块腔极好的稳定性于一身,是20世纪80年代中期由美国Stanford大学最早设计实现的^[16]。经过多年的发展,NPRO激光器已经在多个波段获得了稳定单频输出。德国汉诺威激光中心的Freitag等^[17-18]对NPRO激光器进行了深入研究,他们设计了Nd:YAG的NPRO,获得了2 W的1064 nm单频输出,同时成功将NPRO结构用于产生946 nm和1.44 μm波长的单频激光。2006年,德国InnoLight公司使用Yb:YAG NPRO激光器获得了输出功率1 W的1.03 μm单频输出^[19]。2008年,哈尔滨工业大学Yao等^[20]采用Tm光纤激光器抽运Ho:YAG NPRO晶体,获得了中心波长2.09 μm的单频激光输出,输出功率7.3 W;2011年,Lu等^[21]采用LD抽运单块非平面环形腔Nd:YAG激光晶体,分别获得了1080 mW和580 mW的1064 nm和1319 nm激光输出。2013年,北京理工大学Wang等^[22]研制了Tm:YLF激光器抽运的Ho:YAG NPRO激光器,激光振荡的中心波长为2012 nm,最高输出功率8 W。

3 1.6 μm波段的人眼安全单频激光器

在各种激光波长中,1.4~2.6 μm人眼最大曝光量(MPE)最高,如图1所示,激光对人眼损伤最小,因

此波段可视为人眼安全波段^[23]。在 1.4~2.6 μm 波段能产生受激辐射的激光介质主要为掺 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 离子的激光材料。近来 1.5~1.6 μm 固体激光受到越来越多的关注,该波段刚好位于光通信波长,相对应的光电探测器件具有很高的探测灵敏度,因此 1.5~1.6 μm 波段的激光在系统应用中具有很大的优势,是人眼安全激光器发展的重要方向之一。目前,国际上已有多家科研机构实现了 1.5~1.6 μm 单频激光输出。

实现 1.5~1.6 μm 单频激光输出的主要方法包括光学参量振荡器、光纤激光器和固体激光器。欧洲航天局 (ESA) 和德国航空航天中心 (DLR) 计划采用光学参量振荡器注入锁定技术获得 1.57 μm 和 1.64 μm 单频脉冲激光输出,用于星载大气 CO_2 和 CH_4 含量探测^[24-25]。2011 年,山西大学采用 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器抽运 PPLN 晶体,采用单谐振的方式获得了 1.02 W 的 1.5 μm 连续单频激光输出^[26-27]。

$\text{Er}-\text{Yb}$ 共掺光纤单频激光器是获得 1.5 μm 波段单频输出的另一种重要技术手段^[28-29]。2004 年,韩国 Electronics and Telecommunications Research Institute 使用 Er 光纤激光器获得了 1520~1570 nm 连续可调谐单频激光器^[30]。2009 年,吉林大学采用光纤布拉格光栅对短腔 $\text{Er}-\text{Yb}$ 共掺光纤激光器进行选频,在抽运功率 140 mW 时获得了 4 mW 波长 1544.68 nm 单频激光输出^[31]。2010 年,华南理工大学采用 $\text{Er}-\text{Yb}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤激光器获得功率 300 mW、波长 1.5 μm 、线宽 2 kHz 的单频连续激光输出^[32]。中国科学院上海光学精密机械研究所通过光纤布拉格光栅获得 65 mW、1.5 μm 单频光纤激光输出,并通过边频锁定的方式进行主动稳频,使得激光频率波动控制到 2.5 MHz/h^[33]。目前,深圳市创鑫激光技术有限公司已有 $\text{Er}-\text{Yb}$ 脉冲单频光纤激光器产品,其平均功率可达 1 W;在连续单频光纤激光器产品方面美国 NP Photonics 公司已有单频输出功率 125 mW、线宽小于 5 kHz、输出波长 1530~1565 nm 的单频光纤激光器。为获得高功率单频输出,2004 年英国南安普顿大学采用主振荡功率放大 (MOPA) 结构,使用 $\text{Er}-\text{Yb}$ 共掺光纤对 1552 nm 分布反馈式 (DFB) 激光进行放大,获得了 83 W 连续单频激光输出^[34]。

掺 Er 晶体激光器是近年来获得 1.6 μm 波段高功率单频激光输出的一种方法。1998 年,澳大利亚 Adelaide 大学将 50 mW 单频激光注入到 $\text{Er}:\text{glass}$ 激光脉冲放大器中,获得了 1 mJ,重复频率 1 Hz 的 1552 nm 单频脉冲激光输出^[35]。2001 年, Taccheo 等^[36] 采用 LD 抽运的方法,分别在 1.53 μm 和 1.56 μm 处得到功率超过 200 mW 的单频输出,可调谐波长范围为 1528.5~1570.2 nm。同年 Yanagisawa 等^[37] 采用注入锁定方法得到了波长 1.54 μm 、脉冲能量 10.9 mJ、重复频率 15 Hz 的单频脉冲输出。2013 年,山西大学采用 LD 抽运 $\text{Er}, \text{Yb}:\text{YAB}$ 晶体获得功率 400 mW 的低噪声 1.55 μm 单频激光器^[38]。美国 CTI 公司是较早报道 1.6 μm 单频激光输出的研究机构。2005 年 CTI 公司使用 $\text{Er}-\text{Yb}$ 共掺光纤激光器谐振抽运 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体,使用腔内插 F-P 结构获得了 15 mW 1645 nm 单频激光输出^[39]。其后,该公司又使用注入锁定方式先后获得了重复频率 500 Hz、脉冲能量 16 mJ 的 1645 nm 单频脉冲激光器和重复频率 10 kHz、平均功率 2.2 W 的 1617 nm 单频脉冲激光器^[40-42]。2008 年英国南安普顿大学在环形腔中插入行波声光调制器 (AOM),通过对 AOM 的精细调节控制行波腔正向和逆向振荡光传播损耗,保证环形腔单向输出,在抽运功率为 14 W 时,获得功率为 4.7 W 的 1645 nm 单频激光输出,斜效率为 37%^[42]。2010 年,澳大利亚 Adelaide 大学首次采用 1470 nm 半导体激光器谐振抽运 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体,通过腔内插 F-P 标准具的方式获得了 1617 nm 和 1645 nm 单频激光输出,在 550 mW 抽运功率下获得了 1645 nm 单频激光输出,功率为 30 mW^[43]。

2011 年,美国 Aerospace Corporation 首次将 NPRO 结构运用于 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体获得 1645 nm 的单频激光输出,他们在采用 Er 光纤激光器抽运时,在 4 W 的 1532 nm 光纤激光抽运功率下,获得了 0.5 W 的 1645 nm 单频激光输出,光-光转换效率 11%,采用光纤延时自外差法(延时光纤长度 25 km)测量了激光器的线宽,测得

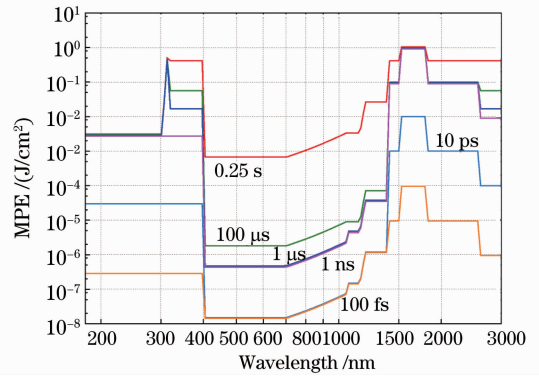


图 1 美国国家标准学会 Z136 激光安全标准不同波段 MEP 值

Fig. 1 MEP values for different wavelength regions according to the Z136 laser safety standard of the American National Standards Institute

其单频线宽为 21 kHz^[44]。

国内在 1.6 μm 单频激光器方面也开展了较多的研究工作。2012 年,哈尔滨工业大学报道了以光学参量振荡器输出的 1532 nm 激光谐振抽运掺杂原子数分数为 0.3% 的 Er:YAG 激光器,通过腔内插 F-P 标准具的方法获得了输出功率 45 mW 的 1645 nm 单频激光输出^[45]。同年北京理工大学报道了光纤激光谐振抽运的 Er:YAG 激光器,通过腔内插 F-P 标准具的方法获得了 749 mW 的 1645 nm 单频激光输出^[46],随后又通过对激光谐振腔型结构的进一步优化获得了 1617 nm 单频输出,输出功率 640 mW^[47]。

为了满足更多领域的应用需求,获得大功率 1.6 μm 波段单频激光输出,北京理工大学 Gao 等^[48]在 2012 年基于前期 1064 nm 和 1319 nm 的 Nd:YAG 非平面环形腔和 2.1 μm 的 Tm:YAG 单块非平面环形腔的研究基础,通过对 Er:YAG 激光晶体的能量传递上转换(ETU)损耗、抽运光吸收效率以及晶体再吸收损耗的分析计算和参数优化,设计了掺杂原子数分数为 0.5%、谐振腔长度 30.6 mm、输出耦合透射率 10% 的 Er:YAG NPRO 激光器,获得了输出功率为 6.1 W 的 1645 nm 单频激光输出,激光器实验系统如图 2 所示。该单频激光器的斜效率 55.2%,光-光转换效率 48.0%,采用光纤延时自外差法(延时光纤长度 25 km)测量了激光器的线宽,测得在单频输出功率 6.1 W 时的激光线宽为 14.4 kHz,在 6.1 W 时 30 min 的功率不稳定性为 0.33%。通过改变晶体温度实现了 Er:YAG 激光器的调谐输出,测得的 Er:YAG 激光器波长温度调谐系数为 2.403 GHz/ $^{\circ}\text{C}$ 。近期,北京理工大学通过进一步改进 Er:YAG 单块非平面环形腔激光器参数,在输出耦合透射率为 18% 的情况下获得了单频输出功率 10.5 W 的 1645 nm 单频激光输出,激光器的斜效率为 60.03%,光-光转换效率为 53.63%,在输出功率 10.5 W 情况下激光器在 x 方向和 y 方向的光束质量因子 M^2 分别是 1.09 和 1.24,输出功率的不稳定性为 0.2%,采用光纤延时自外差法测得激光器的单频线宽是 18.6 kHz(10.5 W 输出功率)^[49],目前这一结果是国内外所报道的各种波长单块非平面环形腔激光器单频输出的最大功率。为了实现 Er:YAG NPRO 的小型化,2012 年,北京理工大学又使用光谱宽度 10 nm 的 1470 nm 半导体激光器谐振抽运 Er:YAG NPRO 激光器,在抽运功率为 3.71 W 时获得了 284 mW 的单频输出,激光器在 x 方向和 y 方向的光束质量因子 M^2 分别是 1.064 和 1.039,输出功率的不稳定性是 0.34%^[50]。同年,北京理工大学采用 Er 光纤激光器谐振抽运 Er:YAG 晶体在重复频率 1000 Hz 下采用声光调 Q 方式获得了 4.02 mJ(1617 nm)和 5.64 mJ(1645 nm)脉冲激光输出,目前正在研究采用注入锁定方式获得满足相干激光雷达应用需求的 1.6 μm 单频脉冲激光器。

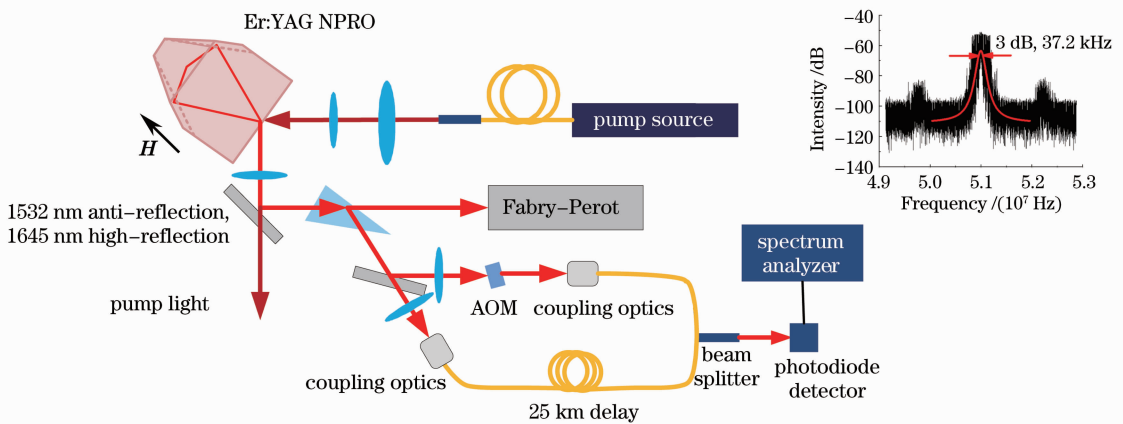


图 2 谐振抽运 1645 nm Er:YAG 单块非平面环形腔单频激光器实验系统图

Fig. 2 Experimental setup of the 1645 nm Er:YAG single frequency non-planar ring resonator

4 结束语

人眼安全波段的高性能单频激光器的研究一直受到人们的关注。本文综述了国内外在 1.6 μm 单频激光器方面的一些研究进展,介绍了国内外学者利用光学参量振荡方法和光纤激光器方法、以掺 Er 晶体为激光介质实现单频输出的研究进展,重点介绍了在谐振抽运的 1645 nm Er:YAG 单块非平面环形腔激光器研

究上所取得的成果。

参 考 文 献

- 1 Zheng Yaohui, Zhang Kuanshou. Diode end-pumped, high-efficiency Nd:YVO₄ laser of single-frequency operation [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2005, 11(2): 88–92.
郑耀辉, 张宽收. 激光二极管泵浦的高效、单频 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 量子光学学报, 2005, 11(2): 88–92.
- 2 Xinlu Zhang, Youlun Ju, Yuezhu Wang. Diode-pumped single frequency Tm, Ho:YLF laser at room temperature [J]. Chin Opt Lett, 2005, 3(8): 463–465.
- 3 F Song, L J Luo, X C Yu, *et al.*. Intense 1.54 μm fluorescence of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped phosphate glass and the three-photon phenomenon of near infrared upconversion luminescence [J]. J Appl Phys, 2010, 107(3): 033110.
- 4 Zhang Weinan, Li Can, Feng Zhouming, *et al.*. Short cavity single frequency fiber laser at 1080 nm based on highly Yb³⁺-doped phosphate fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100601.
张伟南, 李 灿, 冯洲明, 等. 基于高掺 Yb³⁺ 磷酸盐光纤的 1080 nm 短腔单频光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100601.
- 5 T Sasaki, T Kojima, A Yokotani, *et al.*. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers [J]. Opt Lett, 1991, 16(21): 1665–1667.
- 6 G L Bourdet, G Lescroart, R Muller. Spectral characteristics of 2 μm microchip Tm:YVO₄ and Tm, Ho:YLF lasers [J]. Opt Commun, 1998, 150(1): 141–146.
- 7 T Y Fan, J Ochoa. Tunable single-frequency Yb:YAG Laser with 1-W output power using twisted-mode technique [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7(10): 1137–1138.
- 8 E Wu, H Pan, S Zhang, *et al.*. High power single-longitudinal-mode operation in a twisted-mode-cavity laser with a c-cut Nd:GdVO₄ crystal [J]. Appl Phys B, 2005, 80(4): 459–462.
- 9 C Gao, R Wang, Z Lin, *et al.*. 2 μm single-frequency Tm:YAG laser generated from a diode-pumped L-shaped twisted mode cavity[J]. Appl Phys B, 2012, 107(1): 67–70.
- 10 C P Hale, J W Hobbs, P Gatt. Broadly tunable master/local oscillator lasers for advanced laser radar applications [C]. SPIE, 2003, 5086: 253–263.
- 11 Wu Xia, Yang Suhui, Chen Ying, *et al.*. Tunable two-frequency solid-state laser with coupled-cavity configuration [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0314003.
吴 霞, 杨苏辉, 陈 颖, 等. 耦合腔结构可调谐双频固体激光器的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0314003.
- 12 C Pedersen, P L Hansen, T Skettrup, *et al.*. Diode-pumped single-frequency Nd:YVO₄ laser with a set of coupled resonators [J]. Opt Lett, 1995, 20(12): 1389–1391.
- 13 Xi Wenqiang, Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. A high-power continuous-wave laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ laser of single-frequency operation [J]. Chin Phys Lett, 2005, 22(5): 1144–1147.
- 14 Chen Sanbin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, *et al.*. 10 W linearly polarized ring cavity configuration CW single-frequency laser [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 793–796.
陈三斌, 周寿桓, 赵 鸿, 等. 10 W 线偏振连续单频环形腔激光器[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 793–796.
- 15 Zhao Weifang, Hou Wei, Guo Lin, *et al.*. 7.5 W Nd:GdVO₄ single-frequency ring laser [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0514003.
赵伟芳, 侯 玮, 郭 林, 等. 7.5 W Nd:GdVO₄ 环形腔单频激光器[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0514003.
- 16 T J Kane, R L Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. Opt Lett, 1985, 10(2): 65–67.
- 17 I Freitag, I Kröpke, H Welling. Electrooptically fast tunable miniature diode-pumped Nd:YAG ring laser [C]. Advanced Solid State Lasers, 1993. LM10.
- 18 I Freitag, A Tünnermann, H Welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG lasers to output powers of several watts [J]. Opt Commun, 1995, 115(5): 511–515.
- 19 P Burdack, T Fox, M Bode, *et al.*. 1 W of stable single-frequency output at 1.03 μm from a novel, monolithic, non-planar Yb:YAG ring laser operating at room temperature [J]. Opt Express, 2006, 14(10): 4363–4367.
- 20 B Q Yao, X M Duan, D Fang, *et al.*. 7.3 W of single-frequency output power at 2.09 μm from an Ho:YAG monolithic nonplanar ring laser [J]. Opt Lett, 2008, 33(18): 2161–2163.
- 21 Lu Yuanfu, Zong Nan, Bo Yong, *et al.*. LD pumped monolithic non-planar ring resonator tunable single frequency lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100311.
鲁远甫, 宗 楠, 薄 勇, 等. 激光二极管抽运的单块非平面环形腔可调谐单频激光器[J]. 光学学报, 2011, 31(s1):

- s100311.
- 22 L Wang, C Q Gao, Mingwei Gao, *et al.*. Resonantly pumped monolithic nonplanar Ho:YAG ring laser with high-power single-frequency laser output at 2122 nm [J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 9541–9546.
- 23 American National Standards Institute. American National Standard for Safe Use of Lasers [S]. ANSI Z136.1, 2007.
- 24 Zhang Kuanshou, Li Peng, Liu Jianli. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. *J Shanxi University*, 2012, 35(2): 243–247.
张宽收, 李鹏, 刘建丽. 连续波单共振光学参量振荡器的研究及进展[J]. *山西大学学报*, 2012, 35(2): 243–247.
- 25 A Fix, U Büdenbender, C U Wirth, *et al.*. Optical parametric oscillators and amplifiers for airborne and spaceborne active remote sensing of CO₂ and CH₄ [C]. *SPIE*, 2011, 8182: 818206.
- 26 Liu Jianli, Liu Qin, Li Hong, *et al.*. Low noise, continuous-wave single-frequency 1.5- μm laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Chin Phys B*, 2011, 20(11): 114215.
- 27 Liu Jianli, Liu Qin, Li Xiaoqing, *et al.*. Experimental investigation of continuous-wave single-frequency 1.5 μm intracavity singly resonant optical parametric oscillator [J]. *J Shanxi University*, 2011, 34(2): 219–222.
刘建丽, 刘勤, 李晓青, 等. 1.5 μm 连续内腔单共振光学参量振荡器运转特性的实验研究[J]. *山西大学学报*, 2011, 34(2): 219–222.
- 28 F Song, S J Liu, Z H Wu, *et al.*. Determination of the thermal loading in laser diode pumped erbium ytterbium codoped phosphate glass microchip laser [J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(9): 2327–2332.
- 29 Yin Ke, Jiangming Xu, Leng Jinyong, *et al.*. Research progress of high power fiber Raman lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010004.
殷科, 许将明, 冷进勇, 等. 高功率光纤拉曼激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010004.
- 30 S H Chang, I K Hwang, B Y Kim. Widely tunable single-frequency Er-doped fiber laser with linear cavity [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 13(4): 287–289.
- 31 Zhao Ming, Guo Yubin, Wang Tianshu, *et al.*. Short cavity single-frequency all-fiber Er/Yb co-doped laser [J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2009, 2(1): 81–85.
- 32 S H Xu, Z M Yang, T Liu, *et al.*. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1249–1254.
- 33 Yang Fei, Chen Dijun, Pan Zhengqing, *et al.*. Short linear cavity single-frequency fiber laser with active frequency stabilization by fiber Bragg grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0902005.
杨飞, 陈迪俊, 潘政清, 等. 光纤光栅主动稳频的短直线腔单频光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0902005.
- 34 C Alegria, Y Jeong, C Codemard, *et al.*. 83-W single-frequency narrow-linewidth MOPA using large-core erbium-ytterbium co-doped fiber [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(8): 1825–1827.
- 35 A J McGrath, J Munch, G Smith, *et al.*. Injection-seeded, single-frequency, Q-switched erbium:glass laser for remote sensing [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(24): 5706–5709.
- 36 S Taccheo, G Sorbello, P Laporta, *et al.*. 230-mW diode-pumped single-frequency Er:Yb laser at 1.5 μm [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(1): 19–21.
- 37 T Yanagisawa, K Asaka, K Hamazu, *et al.*. 11-mJ, 15-Hz single-frequency diode-pumped Q-switched Er³⁺/Yb³⁺: phosphate glass laser [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(16): 1262–1264.
- 38 Y Li, J Feng, P Li, *et al.*. 400 mW low noise continuous-wave single-frequency Er,Yb:YAl₃ laser at 1.55 μm [J]. *Opt Express*, 2013, 21(5): 6082–6090.
- 39 R C Stoneman, S W Henderson. High-power eyesafe laser transmitter for microDoppler coherent lidar [C]. 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2001, 1: 342–343.
- 40 R C Stoneman, R Hartman, A I Malm, *et al.*. Coherent laser radar using eyesafe YAG laser transmitters [C]. *SPIE*, 2005, 5791: 167–174.
- 41 R C Stoneman, R Hartman, E A Schneider, *et al.*. Eyesafe diffraction limited single frequency 1 ns pulsewidth Er:YAG laser transmitter [C]. *SPIE*, 2007, 6552: 65520H.
- 42 J W Kim, J K Sahu, W A Clarkson. Efficient single axial mode operation of an Er:YAG ring laser at 1645 nm [C]. *Quantum Electronics and Laser Science*, 2008. CTuAA4.
- 43 N W H Chang, D J Hosken, J Munch, *et al.*. Stable, single frequency Er:YAG lasers at 1.6 μm [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(7): 1039–1042.
- 44 D W Chen, P M Belden, T S Rose, *et al.*. Narrowband Er:YAG nonplanar ring oscillator at 1645 nm [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(7): 1197–1199.

- 45 B Q Yao, X L Liu, L X Yu, *et al.*. Resonantly pumped single frequency Er:YAG laser at 1645 nm [J]. *Laser Phys*, 2012, 22(2): 403–405.
- 46 L N Zhu, C Q Gao, R Wang, *et al.*. Resonantly pumped 1.645 μm single longitudinal mode Er:YAG laser with intracavity etalons [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(10): 1616–1618.
- 47 L N Zhu, C Q Gao, R Wang, *et al.*. Fiber-bulk hybrid Er:YAG laser with 1617 nm single frequency laser output [J]. *Laser Phys Lett*, 2012, 9(9): 674–677.
- 48 C Q Gao, L N Zhu, R Wang, *et al.*. 6.1 W single frequency laser output at 1645 nm from a resonantly pumped Er:YAG non-planar ring oscillator [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(11): 1859–1861.
- 49 R Wang, C Q Gao, Y Zheng, *et al.*. Resonantly pumped 1645 nm Er:YAG non-planar ring oscillator with 10.5 W single frequency output [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(10): 955–957.
- 50 Y Zheng, C Q Gao, R Wang, *et al.*. Single frequency 1645 nm Er:YAG nonplanar ring oscillator resonantly pumped by a 1470 nm laser diode [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(5): 784–786.